

ОЦЕНКА ФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ОБЛАСТИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ S255IR-SMA1

С. В. Салий

Астрономическая обсерватория Уральского федерального университета

По радиolinиям метанола, наблюдавшимся на IRAM30m на 0.8 мм в области звездообразования S255IR-SMA1, проведена оценка физических условий. В приближении большого градиента скорости (LVG) оценены значения кинетической температуры газа (170 K), плотности молекулярного водорода ($3 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$), удельной лучевой концентрации метанола ($2 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}\text{с}$), относительного обилия метанола (10^{-7}) и фактора заполнения диаграммы (10%). Значения параметров характерны для горячих плотных ядер. Показано, что объект S255IRR-SMA1 в рамках диаграммы направленности (7.5") существенно неоднороден.

ESTIMATION OF PHYSICAL CONDITIONS IN STAR FORMATION REGION S255IR-SMA1

S. V. Salii

Astronomical Observatory of the Ural Federal University

The physical conditions were estimated from the methanol radio lines observed at 0.8 mm with IRAM30m in the star-forming region S255IR-SMA1. In the approximation of a large velocity gradient (LVG), the values of the gas kinetic temperature (170 K), the number density of molecular hydrogen ($3 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$), the specific column density of methanol ($2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}\text{s}$), the relative abundance of methanol (10^{-7}) and the filling factor (10%). The parameter values are typical for hot dense cores. It is shown that the S255IR-SMA1 object is significantly inhomogeneous within the diagram (7.5").

Молекула метанола является важнейшей составляющей межзвездного газа в областях звездообразования. Обилие молекул метанола по отношению к молекулярному водороду в областях образования массивных звезд может достигать 10^{-6} . Являясь слабоасимметричным волчком, молекула метанола имеет богатый спектр, что позволяет использовать эту молекулу для оценки физических условий.

S255IR — известная область образования массивных звезд, расположенная на расстоянии 1.78 ± 0.12 кпк, — состоит из нескольких плотных ядер. Наиболее интересным является вращающееся плотное ядро S255IR-SMA1, предположительно это диск вокруг массивного (около $20 M_{\odot}$) молодого звездного объекта (см. [1] и ссылки в ней).

В январе 2019 г. на 30-м радиотелескопе IRAM были проведены наблюдения S255IR-SMA1 ($\alpha = 06 : 12 : 54.010, \delta = +17 : 59 : 23.06$) в линиях метанола. Наблюдения проводились в четырех полосах с частотами 326.7–330.7, 329.5–334.5, 342.4–346.4 и 346.1–350.2 ГГц. На этих частотах размер диаграммы направленности (HPBW) составляет 7.5", спектральное разрешение ~ 1.4 км/с. Уровень шума (2σ) составил около 0.03 K (за исключением полосы 326.7–328.5 ГГц, где шум существенно увеличивается к краю диапазона и достигает 0.5 K). Наблюдения выполнялись в режиме «wobbler switching mode» с помощью приемника EMIR. Антенная температура калибрована стандартным методом «chopper-wheel». Обработка полученных данных проводилась в программе CLASS пакета GILDAS (<http://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS>).

Согласно каталогу Splatalogue (<http://www.cv.nrao.edu/php/splat/advanced.php>) в рассмотренные частотные диапазоны попадают 42 перехода метанола с энергиями верхних уровней до 1000 K и эйнштейновскими коэффициентами спонтанного перехода $A_E > 10^{-9} \text{ с}^{-1}$. Из этих переходов в S255IR уверенно (с интенсивностями $> 5\sigma$) отождествлены девять линий (табл. 1). В случаях блендирования переходов принимались во внимание значения эйнштейновских коэффициентов переходов и отождествление проводилось в пользу перехода с большими значениями A_E .

Для анализа физических параметров газа, при которых возбуждаются наблюдаемые линии, мы построили простую модель переноса излучения, которая использует приближение большого градиента скорости (LVG). В модели оценивались следующие параметры: кинетическая температура газа (T_{gas} , K), плотность молекулярного водорода (n_{H_2} , см^{-3}), удельная лучевая концентрация метанола ($N_{\text{CH}_3\text{OH}}/\Delta V$, $\text{см}^{-3}\text{с}$) и относительное обилие метанола ($N_{\text{CH}_3\text{OH}}/N_{\text{H}_2}$). Поскольку фактор заполнения диаграммы направленности (f) неизвестен, оценка этого параметра также была включена в анализ. В модели не учитывались реальные профили линий, но используется некоторая усредненная ширина линий. Согласно наблюдениям большинство ярких линий имеют ширины не менее 5 км/с, поэтому при вычислениях использовалась фиксированная ширина линии 5 км/с. Более подробно метод описан, например, в работе [2]. В качестве оценок физических параметров принимался набор, при котором модельные значения интенсивностей линий метанола наиболее близки к наблюдаемым величинам (реализуется минимальное значение χ^2). Для оценки доверительных интервалов полученных параметров был применен байесовский анализ (см., например, [3]). Для этого с помощью базы населенностей энергетических уровней метанола [4] были вычислены модельные значения интенсивностей линий ($T_{\text{mi}}(p)$) для регулярной 5-мерной сетки параметров:

$$p = (T_{\text{gas}}, N_{\text{CH}_3\text{OH}}/\Delta V, n_{\text{H}_2}, N_{\text{CH}_3\text{OH}}/N_{\text{H}_2}, f).$$

Вероятность, что N наблюдавшихся линий с интенсивностями T_{oi} , определенных с точностью σ_i , реализуется при некотором наборе параметров p , вычисляется как

$$P(T_o|p) = \prod_i^N \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{T_{oi}-T_{\text{mi}}(p)}{\sigma_i}\right)^2}. \quad (1)$$

Интегрируя по каждому из параметров сетки, получаем распределение байесовской вероятности по выбранному параметру.

В результате моделирования было получено, что с вероятностью 95 % набор из 12 уверенно отождествленных линий мог быть сгенерирован при физических условиях, представленных в табл. 2.

Полученные значения параметров характерны для горячих плотных ядер и хорошо согласуются со значениями, определенными в работе [2]. Низкий фактор заполнения диаграммы направленности ($< 20\%$) свидетельствует о существенной неоднородности исследуемого источника. Сравнивая значения интенсивностей, соответствующие найденным условиям возбуждения (табл. 2), с наблюдаемыми интенсивностями, можно заметить, что не все линии приближаются хорошо (см. рисунок, слева). Факт, что невозможно в рамках одной модели приблизить все наблюдавшиеся линии с точностью до ошибок наблюдений, также свидетельствует о неоднородности объекта.

О неоднородности объекта можно судить и по спектральным профилям наиболее ярких линий (см. рисунок, справа). Профили линий на 331.502 и 342.729 ГГц существенно негауссовы. На них явно выделяется синее крыло (от -2 до 3 км/с), которое угадывается на профиле линии на 349.106 ГГц и практически отсутствует на профиле линии на 330.793 ГГц. Возможно, вклад в излучение в линиях на 331.502, 342.729 и 349.106 ГГц, помимо

Таблица 1. Отождествленные линии метанола в частотных полосах 326.7–334.5 и 342.4–350.2 ГГц

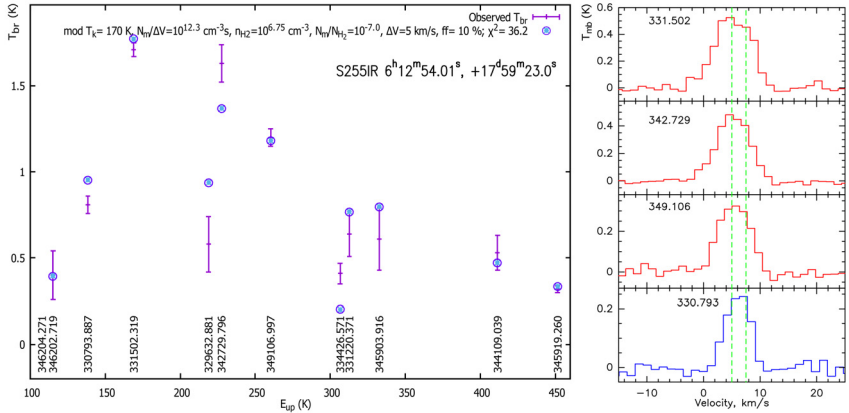
Частота, МГц	E_{up} , К	A_{ij} , с ⁻¹	Переход	$\int T_a$, К·км/с	V_{lsr} , км/с	ΔV , км/с	T_a , К
326961.232	133.1	1.29E-4	$10_{-1} - 9_0 v_t 0 E$				<0.1
327317.253	218.7	5.88E-5	$12_2 - 11_3 v_t 0 A^{--}$				<0.1
327407.873	492.8	5.63E-5	$17_5 - 18_4 v_t 0 A^{++}$				<0.1
327440.644	492.8	5.63E-5	$17_5 - 18_4 v_t 0 A^{--}$				<0.1
327486.835	307.2	5.62E-5	$13_4 - 14_3 v_t 0 E$	1.56 ± 0.28	5.7 ± 0.2	2.9 ± 3.2	0.51 ± 0.07
327596.176	791.6	6.29E-5	$24_4 - 23_5 v_t 0 E$				<0.1
328468.853	536.9	6.31E-5	$20_3 - 19_4 v_t 0 A^{++}$	1.42 ± 0.49	4.2 ± 1.4	9.4 ± 4.7	0.14 ± 0.07
329632.881	218.8	6.00E-5	$12_2 - 11_3 v_t 0 A^{++}$	1.37 ± 0.22	5.9 ± 0.5	6.9 ± 1.4	0.19 ± 0.05
330172.526	810.7	4.19E-5	$11_3 - 12_4 v_t 0 A^{--}$				<0.05
330172.553	810.7	4.19E-5	$11_3 - 12_4 v_t 0 A^{++}$				<0.05
330355.512	537.0	6.42E-5	$20_3 - 19_4 v_t 0 A^{--}$				<0.05
330793.887	146.3	5.39E-5	$8_{-3} - 9_{-2} v_t 0 E$	1.35 ± 0.05	6.1 ± 0.1	4.8 ± 0.2	0.26 ± 0.04
331071.711	597.8	3.04E-8	$12_3 - 11_5 v_t 1 E$	<i>блендируется с линией CH₃CN на 331071.544 МГц</i>			
331220.371	320.6	5.24E-5	$16_{-1} - 15_{-2} v_t 0 E$	0.76 ± 0.10	5.8 ± 0.2	3.5 ± 0.5	0.21 ± 0.05
331502.319	169.0	1.96E-4	$11_1 - 11_0 v_t 0 A^{+-}$	4.39 ± 0.06	5.2 ± 0.1	7.5 ± 0.1	0.55 ± 0.05
331755.099	823.9	1.27E-4	$15_{-5} - 16_{-6} v_t 0 E$				<0.05
331930.616	791.6	9.79E-6	$13_7 - 12_8 v_t 0 E$				<0.05
332505.432	299.6	4.05E-8	$15_1 - 15_{-1} v_t 0 E$	1.25 ± 0.09	7.0 ± 0.2	5.2 ± 0.5	0.22 ± 0.04
332996.563	614.5	6.33E-5	$22_{-2} - 21_{-3} v_t 0 E$	0.23 ± 0.07	5.3 ± 0.5	3.5 ± 1.1	0.06 ± 0.04
333864.722	125.5	8.04E-7	$9_1 - 8_{-2} v_t 0 E$				<0.04
334226.177	964.4	1.99E-5	$21_5 - 22_4 v_t 0 E$				<0.04
334426.571	314.5	5.55E-5	$3_0 - 2_1 v_t 0 E$	0.57 ± 0.06	5.4 ± 0.2	4.1 ± 0.4	0.13 ± 0.04
342726.474	979.0	6.75E-5	$20_{-6} - 19_{-7} v_t 0 E$	<i>блендируется с линией CH₃OH на 342729.796 МГц</i>			
342729.796	227.5	2.12E-4	$13_1 - 13_0 v_t 0 A^{+-}$	3.53 ± 0.07	5.3 ± 0.1	6.8 ± 0.2	0.49 ± 0.03
343005.882	60.7	1.09E-7	$5_{-2} - 4_1 v_t 0 E$				<0.03
343599.019	624.0	3.58E-5	$13_{-1} - 14_{-2} v_t 0 E$	0.21 ± 0.09	5.5 ± 0.9	3.9 ± 2.5	0.05 ± 0.03
343687.066	902.3	3.89E-5	$20_3 - 20_2 v_t 0 E$				<0.03
344064.646	885.8	1.01E-6	$20_2 - 19_5 v_t 0 E$				<0.03
344109.039	419.4	6.81E-5	$18_2 - 17_3 v_t 0 E$	0.63 ± 0.07	5.7 ± 0.2	3.7 ± 0.5	0.16 ± 0.03
344312.267	491.9	1.77E-4	$10_{-2} - 11_{-3} v_t 0 E$	<i>блендируется с линией SO на 344310.612 МГц</i>			
344443.433	451.2	9.35E-5	$19_1 - 18_2 v_t 0 A^{++}$	0.56 ± 0.07	5.5 ± 0.2	4.2 ± 0.6	0.16 ± 0.03
344970.808	761.6	8.95E-5	$12_7 - 11_6 v_t 0 E$				<0.03
345903.916	332.7	9.03E-5	$16_1 - 15_2 v_t 0 A^{--}$	0.99 ± 0.18	6.0 ± 0.4	5.2 ± 1.0	0.18 ± 0.02
345919.260	459.4	7.30E-5	$18_{-3} - 17_{-4} v_t 0 E$	0.64 ± 0.03	5.9 ± 0.1	6.4 ± 0.3	0.09 ± 0.02
346202.719	115.2	2.18E-5	$5_4 - 6_3 v_t 0 A^{--}$	1.30 ± 0.14	4.9 ± 0.3	5.2 ± 0.6	0.24 ± 0.04
346204.271	115.2	2.18E-5	$5_4 - 6_3 v_t 0 A^{++}$	1.30 ± 0.14	4.9 ± 0.3	5.2 ± 0.6	0.24 ± 0.04
347445.285	856.3	4.04E-5	$19_3 - 19_2 v_t 0 E$	0.27 ± 0.07	5.8 ± 0.5	4.0 ± 1.6	0.06 ± 0.03
347507.451	57.1	1.76E-8	$5_2 - 5_{-1} v_t 0 E$				<0.03
347745.442	71.0	2.68E-8	$6_2 - 6_{-1} v_t 0 E$				<0.03
347918.109	791.6	1.66E-6	$24_4 - 25_1 v_t 0 E$				<0.03
348031.826	686.2	1.12E-5	$7_3 - 8_2 v_t 0 E$				<0.03
349106.997	260.2	2.20E-4	$14_1 - 14_0 v_t 0 A^{+-}$	2.32 ± 0.07	5.4 ± 0.1	6.3 ± 0.2	0.35 ± 0.03

 Таблица 2. Значения параметров, при которых реализуется минимум χ^2 для набора из 12 наиболее ярких линий метанола в частотных полосах 326.7–334.5 и 342.4–350.2 ГГц

Параметр	Граница диапазона	Значение параметра	95% Доверительный интервал
T_{gas} , К	10–600	170	160–180
n_{H_2} , см ⁻³	$10^3 - 10^9$	3×10^6	$3 \times 10^5 - 3 \times 10^7$
$N_{CH_3OH}/\Delta V$, см ⁻³ с	$3 \times 10^7 - 10^{14}$	2×10^{12}	$1.6 \times 10^{12} - 2.5 \times 10^{12}$
N_{CH_3OH}/N_{H_2}	$10^{-9} - 3 \times 10^{-6}$	10^{-7}	$3 \times 10^{-8} - 3 \times 10^{-7}$
f , %	10–100	10	< 20 %

известных [2] сгустков на скоростях ~ 4 и ~ 8 км/с (зеленый пунктир на рисунке справа), дает сгусток на скорости около 2 км/с, в котором зарегистрировано мазерное излучение на переходе на частоте 349.107 ГГц [1]. Но достоверно выделить его при имеющемся спектральном разрешении (1.4 км/с) не представляется возможным.

Для получения более точных оценок необходимы наблюдения с более высоким спектральным разрешением.



Слева — сопоставление наблюдаемых интенсивностей с модельными значениями, которые обеспечивают минимальное значение χ^2 . Приведены частоты линий в мегагерцах. Справа — спектры наиболее ярких линий метанола. Частоты линий указаны в ГГц. Зеленым пунктиром отмечены скорости известных сгустков

Оценки физических параметров выполнены при поддержке гранта РФФИ № 18-02-00917.

Библиографические ссылки

- [1] Zinchenko I., Liu S. Y., Su Y. N., Sobolev A. M. Detection of a new methanol maser line with ALMA // *Astron. Astrophys.* — 2017. — Vol. 606. — P. L6. 1709.08889.
- [2] Zinchenko I., Liu S. Y., Su Y. N. et al. The Disk-outflow System in the S255IR Area of High-mass Star Formation // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 810, № 1. — P. 10. 1507.05642.
- [3] Ward J. S., Zmuidzinas J., Harris A. I., Isaak K. G. A ^{12}CO J=6-5 Map of M82: The Significance of Warm Molecular Gas // *Astrophys. J.* — 2003. — Vol. 587. — P. 171-185.
- [4] Salii S., Parfenov S., Sobolev A. Updated Base of Methanol Energy Level Populations // *Modern Star Astronomy.* — 2018. — Vol. 1. — P. 276-279.